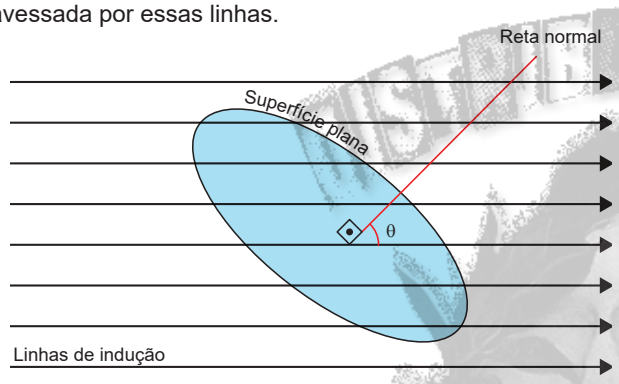
AULA 25

Indução Eletromagnética

Fluxo magnético

Vamos iniciar definindo uma grandeza física chamado fluxo de indução magnética. Para estudar em detalhes o fenômeno da indução magnética, vamos usar um conceito de Faraday: o de linhas de força, que hoje conhecemos por linhas de campo.

Embora as linhas de campo sejam de número infinito, ele convencionou que, para representar um campo magnético, a densidade das linhas seria proporcional à intensidade do campo. Essa densidade de linhas baseia-se na verificação de quantas linhas existem para cada metro quadrado de determinada superfície plana atravessada por essas linhas.



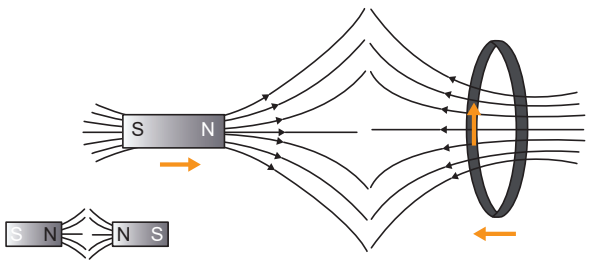
Podemos, então, definir o fluxo de indução magnética como o produto do vetor indução magnética (campo magnético) B pela área da superfície A e pelo cosseno do ângulo θ, formado entre B e uma linha perpendicular à superfície, chamada reta normal. Assim:

$$\phi = BA\cos\theta$$

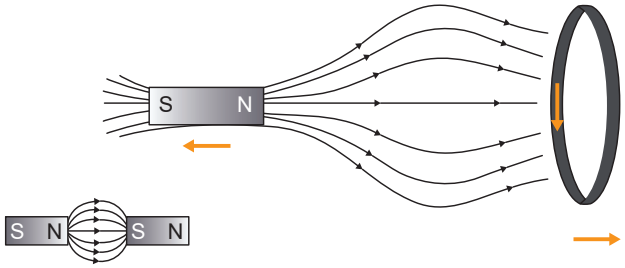
Para o SI (Sistema Internacional de Unidades), a unidade de fluxo magnético denomina-se weber (Wb). A unidade adotada para se medir o fluxo de indução magnética pelo SI é weber (Wb), em homenagem ao físico alemão Wilhelm Weber, e caracteriza tesla-metro quadrado ($T \cdot m^2$).

Lei de Faraday-Lenz-Neumann

Ao variamos o fluxo magnético em um circuito, verifica-se experimentalmente que ocorre o surgimento de uma corrente elétrica de forma que o fluxo do campo criado por ela contraria a variação do fluxo do campo do campo induzido.



O campo magnético induzido se opõe à aproximação do imã.



O campo magnético induzido se opõe ao afastamento do imã.

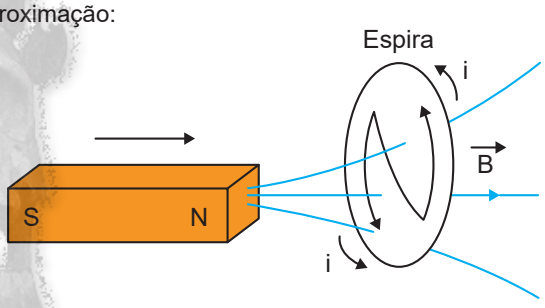
Caso queiramos calcular a ddp induzida do sistema utilizamos a expressão:

$$E = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Onde o sinal negativo indica o efeito da oposição

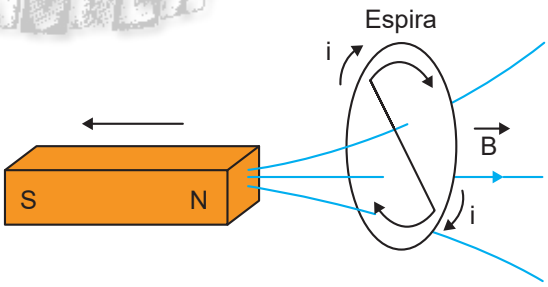
Mas para tornar o estudo da Lei de Lenz mais fácil, usaremos a regra das espiras de aproximação e afastamento de imãs para determinar o sentido da corrente. Norte se aproximando, desenha-se um N na região interna da espira e verifica-se o sentido da corrente.

a) Aproximação:

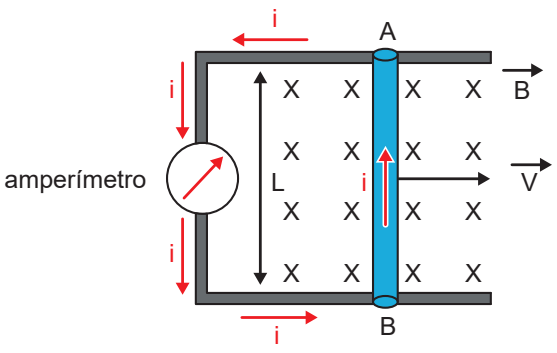


Norte se afastando, desenha-se um S na região interna da espira e verifica-se o sentido da corrente.

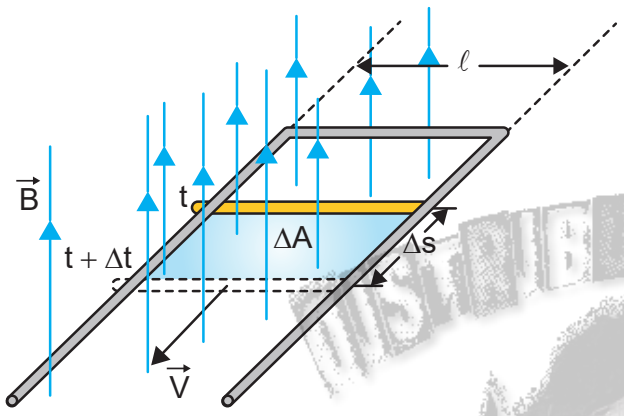
b) Afastamento:



Considere, então, um bastão imerso em um campo magnético uniforme e deslocando-se com velocidade V. Elétrons livres do fio entram em movimento ordenado devido ao movimento do condutor reto, ficando sujeitos à presença de uma força magnética cujo sentido é determinado pela regra da mão direita. Quando fechamos o circuito, surge uma corrente elétrica em consequência da ddp (força eletromotriz induzida) entre os extremos do condutor móvel, que atravessa o campo magnético uniforme B. Assim, a corrente elétrica que surge recebe o nome de corrente elétrica induzida.



A ddp associada ao movimento da barra é dada por $\varepsilon = BvL$ e pode ser verificada pela lei de Faraday-Lenz conforme verifica-se a seguir:



Nessa situação, temos:

$$\phi = BA \Rightarrow \Delta\phi = B\,\Delta A \quad (I)$$

Mas $\Delta A = \ell\,\Delta s$, em que Δs é a distância percorrida pelo fio retilíneo durante o intervalo de tempo Δt.

$$\Delta\phi = B\,\ell\,\Delta s$$

Dividindo essa expressão por Δt, obtemos:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{B\ell\Delta s}{\Delta t}$$

Com $\frac{\Delta s}{\Delta t} = v : \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = B\,\ell\,v$.

Exercícios de Fixação

1. (UFJF-pism 3/2021) Um circuito retangular feito de material condutor ideal está posicionado com sua área perpendicularmente ao eixo de um imã estático, como mostra a figura (a). Mantendo o circuito parado, afasta-se o imã, perpendicularmente à área do circuito com uma velocidade v_0 (figura (b)), a diferença de potencial v_{ab} entre os finais do circuito é medida.

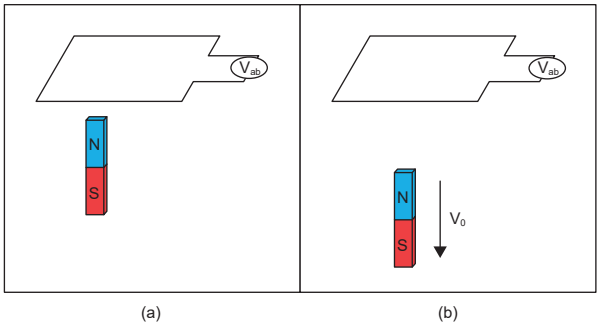
Com base no descrito acima, algumas afirmações são feitas:

I. v_{ab} é nula, independentemente da velocidade com que o imã é afastado do circuito, já que o circuito e o imã não estão conectados;

II. v_{ab} aumenta, porque como há uma diminuição do fluxo do campo magnético, isto gerará uma corrente induzida e esta corrente induzida gera uma força eletromotriz, v_{ab}.

III. v_{ab} diminui, porque como há uma diminuição do fluxo do campo magnético, isto gerará uma corrente induzida e esta corrente induzida gera uma força eletromotriz, v_{ab}.

IV. O valor de v_{ab} depende da velocidade v_0 com que o imã se move.



Podemos afirmar que:

A) somente a primeira afirmação está correta.
B) há duas afirmações corretas.
C) há somente uma afirmação incorreta.
D) todas as afirmações estão incorretas.
E) somente a última afirmação está correta.

2. Uma corrente elétrica é induzida em um anel condutor que está no plano horizontal, e o sentido de circulação dos portadores de corrente é horário, quando vista de cima.

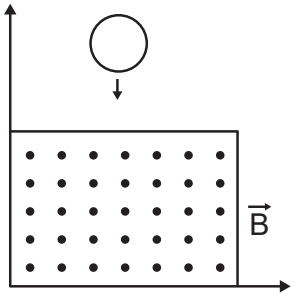
Com base nas informações, analise as proposições.

I. Um campo magnético constante aponta verticalmente para baixo;
II. Um campo magnético, cuja magnitude está aumentando, aponta verticalmente para cima;
III. Um campo magnético, cuja magnitude está aumentando, aponta verticalmente para baixo;
IV. Um campo magnético, cuja magnitude está diminuindo, aponta verticalmente para baixo;
V. Um campo magnético, cuja magnitude está diminuindo, aponta verticalmente para cima.

Assinale a alternativa correta.

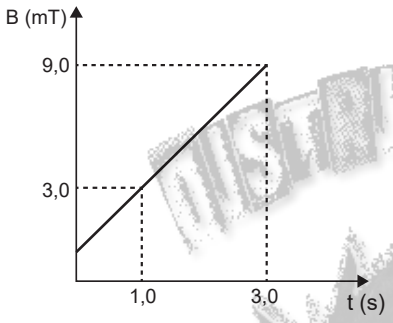
A) Somente as afirmativas II e IV são verdadeiras.
B) Somente as afirmativas III e V são verdadeiras.
C) Somente a afirmativa I é verdadeira.
D) Somente as afirmativas IV e V são verdadeiras.
E) Somente as afirmativas II e III são verdadeiras.

3. Um anel metálico cai verticalmente devido ao seu peso em uma região de campo magnético constante, saindo perpendicularmente ao plano da folha, de acordo com a figura abaixo.



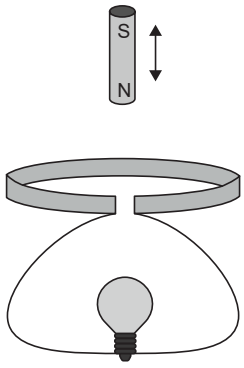
Assinale a alternativa correta sobre a corrente induzida no anel.
A) Não existe corrente induzida no anel durante o percurso da queda, pois o campo é constante.
B) A corrente induzida no anel é no sentido horário quando o anel entra na região do campo.
C) A corrente induzida no anel é no sentido anti-horário quando o anel entra na região do campo.
D) Existe uma corrente induzida durante todo o instante de queda devido à variação da posição do anel em relação ao campo.
E) Existe uma corrente induzida somente quando o anel encontra-se totalmente imerso no campo.

4. (EFOMM/2022) Considere uma região do espaço em que a intensidade do campo magnético, apontando para cima, esteja variando em função do tempo como mostrado no gráfico abaixo. Uma espira quadrada condutora de lado 20,0 cm e resistência R = 10,0 mΩ é mergulhada nessa região de tal forma que as linhas de campo sejam perpendiculares ao seu piano. Quando a espira é vista por cima, o módulo e o sentido da corrente nela induzida são



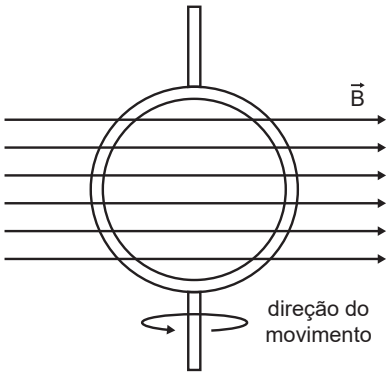
A) 12,0 A, no sentido horário.
B) 12,0 A, no sentido anti-horário.
C) 12,0 mA, no sentido horário.
D) 12,0 mA, no sentido anti-horário.
E) 3,0 mA, no sentido anti-horário.

5. (EPCAR (AFA) 2012) A figura a seguir mostra um ímã oscilando próximo a uma espira circular, constituída de material condutor, ligada a uma lâmpada.



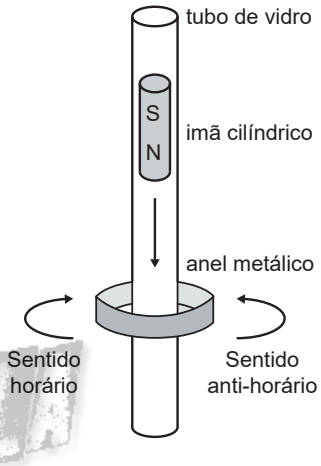
A resistência elétrica do conjunto espira, fios de ligação e lâmpada é igual a R e o ímã oscila em MHS com período igual a T. Nessas condições, o número de elétrons que atravessa o filamento da lâmpada, durante cada aproximação do ímã
A) é diretamente proporcional a T.
B) é diretamente proporcional a T^2.
C) é inversamente proporcional a T.
D) não depende de T.

6. (ITA/2021) Considere uma bobina circular de 200 voltas e 5,0 cm de raio, localizada em uma região onde existe um campo magnético uniforme de 1,25 T. A espira encontra-se inicialmente paralela ao campo magnético e é girada em um quarto de volta em 15 ms.



Assinale a alternativa que contém o valor que melhor representa a força eletromotriz média induzida na espira durante o movimento de giro descrito.
A) 5,0 V
B) 15 V
C) 30 V
D) 60 V
E) 130 V

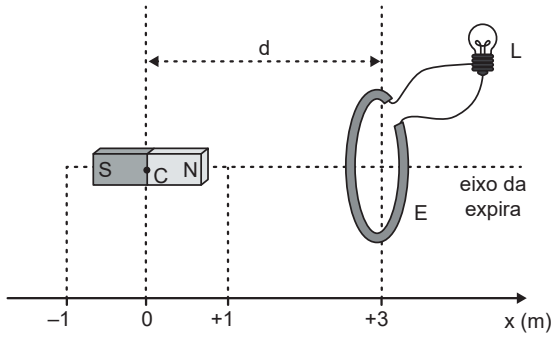
7. A figura a seguir representa um tubo feito de vidro, um anel metálico feito de ouro e um ímã cilíndrico.



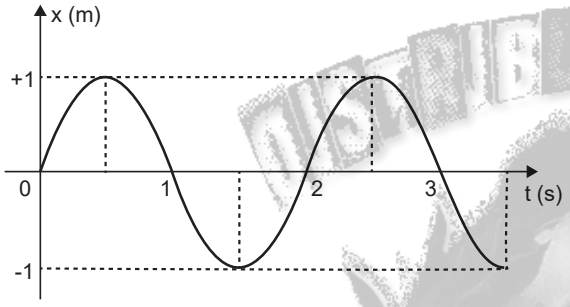
O ímã ao atravessar verticalmente todo o tubo com o polo norte voltado para baixo, provoca uma corrente elétrica induzida no anel. Na figura são indicados os sentidos horário e anti-horário possíveis para a corrente induzida.

De acordo com as Leis de Faraday e de Lenz, a corrente elétrica induzida que circula no anel é
A) sempre no sentido horário, durante toda a queda do ímã.
B) sempre no sentido anti-horário, durante toda a queda do ímã.
C) inicialmente no sentido horário enquanto o ímã se aproxima do anel e no sentido anti-horário quando ele se afasta.
D) inicialmente no sentido anti-horário enquanto o ímã se aproxima do anel e no sentido horário quando ele se afasta.

8. Considere que a intensidade do campo magnético gerado por um ímã em forma de barra varia na razão inversa do quadrado da distância **d** entre o centro C deste ímã e o centro de uma espira condutora E ligada a uma lâmpada L conforme ilustrado na figura a seguir.



A partir do instante $t_0 = 0$ o ímã é movimentado para a direita e para a esquerda de tal maneira que o seu centro C passa a descrever um movimento harmônico simples indicado abaixo pelo gráfico da posição (x) em função do tempo (t).



Durante o movimento desse ímã, verifica-se que a luminosidade da lâmpada

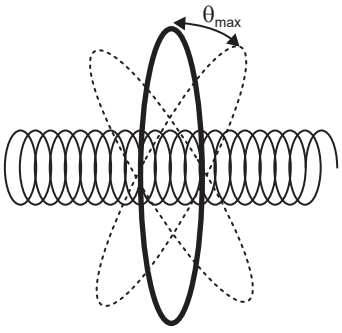
A) aumenta à medida que o centro C do ímã se move da posição x = –1 m até x = + 1 m.

B) diminui entre os instantes $t = \frac{n}{2}T$ e $t' = \frac{(n+1)}{2}T$, onde T é o período do movimento e **n** é ímpar.

C) é nula quando o centro C do ímã está na posição $x = \pm 1$ m.

D) é mínima nos instantes $t = \frac{m}{4}T$, onde T é o período do movimento e **m** é um número par.

9. (ITA)



A figura mostra uma espira circular, de raio **a** e resistência R, com centro situado sobre o eixo de um solenoide muito longo, com **n** voltas por unidade de comprimento e raio b (b < a). No instante inicial, t = 0, o eixo do solenoide encontra-se perpendicular ao plano da espira, que oscila segundo a expressão $\theta = \theta_{max}\,\text{sen}(\omega t)$ em que ω é a frequência angular do movimento. Se a corrente que passa pelo solenoide cresce linearmente com o tempo, conforme I = Kt, e sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, então a intensidade da corrente elétrica induzida na espira é

A) $\frac{\mu_0 nK\pi a^2}{R}$

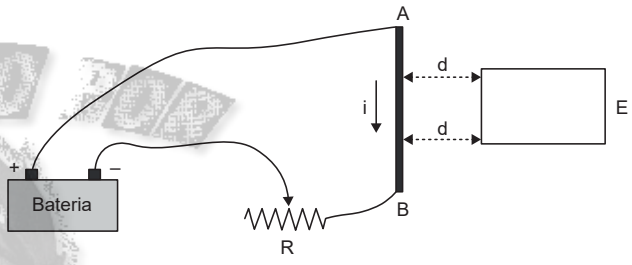
B) $\frac{\mu_0 nK\pi b^2}{R}$

C) $\frac{\mu_0 nK\omega t\theta_{max}\pi b^2}{R}\left|\text{sen}(\omega t)\right|$

D) $\frac{\mu_0 nK\omega t\theta_{max}\pi b^2}{R}\left|\cos(\omega t)\right|$

E) 0.

10. Uma espira condutora E está em repouso próxima a um fio retilíneo longo AB de um circuito elétrico constituído de uma bateria e de um reostato R, onde flui uma corrente **i**, conforme ilustrado na figura abaixo.



Considerando exclusivamente os efeitos eletromagnéticos, pode-se afirmar que a espira será

A) repelida pelo fio AB se a resistência elétrica do reostato aumentar.

B) atraída pelo fio AB se a resistência elétrica do reostato aumentar.

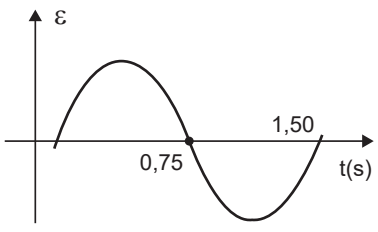
C) sempre atraída pelo fio AB independentemente de a resistência elétrica do reostato aumentar ou diminuir.

D) deslocada paralelamente ao fio AB independentemente de a resistência elétrica do reostato aumentar ou diminuir.

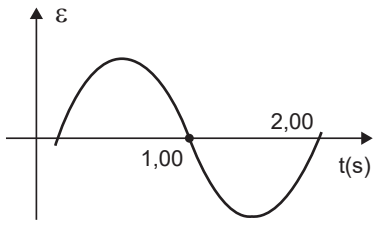
11. (AFA) Os carregadores de bateria sem fio de smartphones, também conhecidos como carregadores *wireless*, são dispositivos compostos de bobina e ligados à rede elétrica, que carregam as baterias dos aparelhos apenas pela proximidade, através do fenômeno de indução eletromagnética. Para isso, o smartphone deve ser apto à referida tecnologia, ou seja, também possuir uma bobina, para que nela surja uma força eletromotriz induzida que carregará a bateria.

Se na bobina de um carregador (indutora), paralela e concêntrica com a bobina de um smartphone (induzida), passa uma corrente $i = 2\text{sen}(4\pi t)$ com **t** em segundos, o gráfico que melhor representa a força eletromotriz induzida (ε) na bobina do smartphone, em função do tempo (t) é

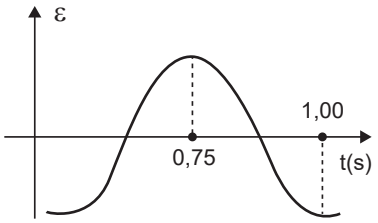
A)



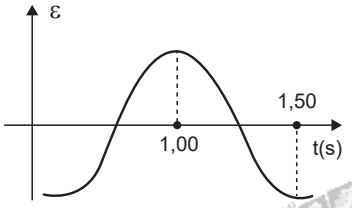
B)



C)



D)



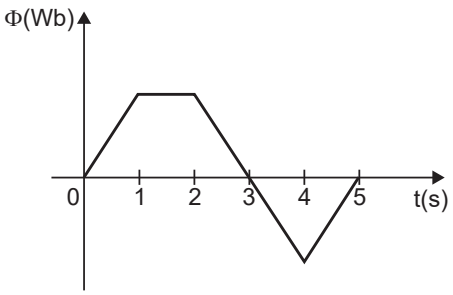
12. Elétrons com energia cinética inicial de 2 MeV são injetados em um dispositivo (bétatron) que os acelera em uma trajetória circular perpendicular a um campo magnético cujo fluxo varia a uma taxa de 1000 Wb/s. Assinale a energia cinética final alcançada pelos elétrons após 500.000 revoluções.
A) 498 MeV B) 500 MeV
C) 502 MeV D) 504 MeV
E) 506 MeV

13. (Efomm/2017) Um fio de resistência 5Ω e 2,4Ω de comprimento forma um quadrado de 60 cm de lado. Esse quadrado é inserido por completo, com velocidade constante, durante 0,90 segundos em um campo magnético constante de 10,0 T (de forma que a área do quadrado seja perpendicular às linhas do campo magnético). A intensidade de corrente que se forma no fio é i_1.

Outro fio reto de 2,0 m de comprimento possui uma intensidade de corrente i_2, quando imerso em um campo magnético constante de módulo 10,0 T. A força magnética que atua no fio possui módulo 8,0 N. A direção da força é perpendicular à do fio e à direção do campo magnético.

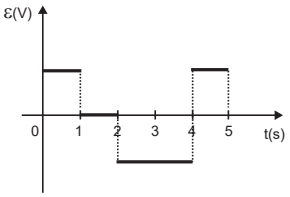
A razão entre os módulos de i_1 e i_2 é:
A) 0,2 B) 0,4
C) 0,5 D) 2,0
E) 4,0

14. (Esc. Naval/2013) Analise a figura a seguir.

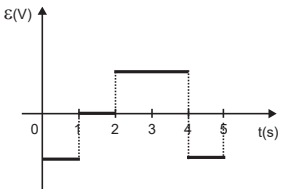


O gráfico da figura acima registra a variação do fluxo magnético Φ, através de uma bobina ao longo de 5 segundos. Das opções a seguir, qual oferece o gráfico da f.e.m induzida, ε em função do tempo?

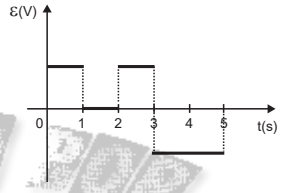
A)



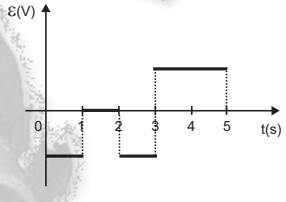
B)



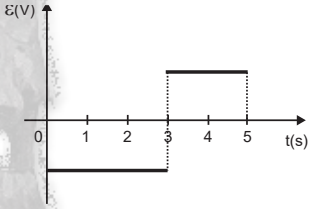
C)



D)



E)



15. O fluxo magnético que atravessa cada espira de uma bobina cilíndrica com 50 espiras, em função do tempo, é dado pela expressão Φ = 2t, entre os tempos t = 1 e t = 10 s, em que o fluxo é dado em Wb. Para esse intervalo de tempo, determine:
A) o módulo da força eletromotriz média induzida.
B) o sentido da corrente induzida, considerando que o campo magnético está "entrando" no plano do papel, e o plano transversal da bobina é o próprio plano do papel.

GABARITO

AULA 25				
1	**2**	**3**	**4**	**5**
B	A	B	C	D
6	**7**	**8**	**9**	**10**
E	D	C	B	B
11	**12**	**13**	**14**	**15**
C	C	D	B	*

* **15:** Sentido anti-horário, 100V

Resolução

01.

I. Não precisam estar conectados para que haja o fenômeno da indução. Hoje em dia há controles de mesas digitalizadoras como essa que estou usando que usam esse fenômeno. A caneta não é recarregada via cabo, sempre que ela é usada, a mesa induz nela uma corrente, a distância, sem fio, que a carrega.

II. A lei de Faraday-Lenz-Neumann relaciona a fem e a o fluxo da seguinte forma

$$\text{Fem, média} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}.$$

Isso mostra que quando o fluxo diminui a fem aumenta, por isso este item está correto.

III. Como visto no item anterior, quando o fluxo do campo diminui, a fem aumenta, o que torna esse item errado.

IV. A variação do fluxo do campo magnético através da espira depende da velocidade; pense, por exemplo, em um afastamento bem lento e em outro bem rápido, perceberá que em um caso a variação do número de linhas através da espira é bem diferente da variação no outra.

Resposta: B

02. Deve-se observar que a corrente induzida no anel surge devido à variação do fluxo de algum campo magnético através da superfície do anel.

Acerca desse campo magnético, cujo fluxo através da superfície do anel está variando, são feitas as cinco afirmações acima. Analisemos uma a uma:

I. O fluxo de um campo magnético através de uma certa superfície depende tanto do módulo desse campo quanto da área da superfície. A área da superfície do anel, nesse caso, é constante, pois o anel não muda seu tamanho, logo a variação do flluxo do campo magnético só pode se dar pela variação do próprio campo. Uma vez que esse item sugere que o campo é constante, torna-se falso, pois — dessa forma — não há variação do fluxo do campo. Nesse caso, não haveria corrente induzida, o que contraria o pressuposto básico da questão.

II. Lembremo-nos de que a corrente induzida surge para se opor à variação do fluxo do campo magnético inicial. Se este campo aponta verticalmente para cima e está aumentando, a corrente induzida precisa circular no sentido horário — visto de cima — para criar um campo magnético que aponte verticalmente para baixo, opondo-se ao aumento do fluxo do campo inicial. Assim, este item está correto.

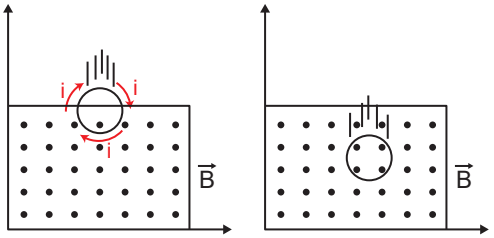
III. Nesse caso a corrente induzida seria no sentido anti-horário — visto de cima — para gerar um campo verticalmente para cima, que se oporia ao aumento do fluxo do campo magnético inicial. Assim, este item está errado.

IV. Como a magnitude do campo magnético, que aponta para baixo, está diminuindo, seu fluxo está diminuindo; para que esse fluxo não diminua é necessário um campo magnético extra para baixo, o que é gerado por uma corrente induzida no sentido horário — visto de cima —, logo o item está correto.

V. Como a magnitude do campo magnético, que aponta para cima, está diminuindo, seu fluxo está diminuindo; para que esse fluxo não diminuísse, seria necessária uma corrente induzida no sentido anti-horário, pois esta produziria um campo induzido para cima. Assim, este item está errado.

Resposta: A

03. A corrente induzida no anel surge no sentido tal que o seu campo magnético se opõe à variação do fluxo do campo magnético externo, que nesse caso é o campo da região apresentada. Quando o anel está entrando na região do campo externo, começa a ocorrer um aumento do fluxo desse campo através da superfície do anel, pois aumenta a área do anel sujeita a esse campo. Para evitar esse aumento, surge uma corrente induzida no sentido horário — visto de frente — que produz um campo entrando na página, portanto, contrário ao campo externo e a seu aumento. Quando o anel entra completamente na região do campo externo, o fluxo desse campo através da superfície do anel passa a ser constante, por isso a corrente induzida desaparece.



Resposta: B

04. Primeiramente vamos determinar o sentido da corrente induzida. Como o campo magnético inicial, verticalmente para cima, está aumentando, o seu fluxo através da espira quadrada também está aumentando; uma corrente induzida deve surgir na espira quadrada de tal modo que produza um campo magnético oposto ao campo magnético inicial, portanto, verticalmente para baixo; para isso a corrente induzida deve ser no sentido horário.

Vamos determinar o valor dessa corrente induzida. Para isso, lembremo-nos da lei de Faraday-Lenz-Neumann que relaciona a variação do fluxo do campo inicial à tensão gerada na espira.

$$|\text{Fem}| = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\Delta(BA)}{\Delta t} = A\frac{\Delta B}{\Delta t} = \ell^2\frac{\Delta B}{\Delta t} =$$

$$= \left(20,0\times10^{-2}\right)\frac{(9,0-3,0)}{(3,0-1,0)\text{mV}} \therefore |\text{Fem}| = 12,0\times10^{-2}\ \text{mV}$$

Podemos relacionar essa fem à corrente induzida por meio da lei de Ohm.

$$|\text{Fem}| = \text{Ri} \therefore i = \frac{|\text{Fem}|}{R} = \frac{12,0\times10^{-2}\ \text{mV}}{10,0\ \text{m}\Omega} \therefore \boxed{i = 12,0\ \text{mA}}$$

Resposta: C

05. O tempo em que ocorre uma aproximação é metade do período do MHS. Durante essa aproximação, aumenta o número de linhas de campo magnético que atravessa a superfície da espira, por isso aumenta o fluxo desse campo e, assim, surge uma corrente induzida na espira. Como a área da superfície da espira é constante, a variação do fluxo só depende da variação do campo. Essa variação é uma função do tempo, mas para evitar complicar demais o problema, pode-se trabalhar com valores médios para a corrente induzida e para a fem.

Da lei de Faraday-Lenz-Neumann

$$|\text{Fem}| = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = A\frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (1) \qquad \text{Rne} = A\Delta B$$

Da lei de Ohm e da definição de corrente média

$$|\text{Fem}|_m = \text{Ri}_m = R\frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (2) \quad \therefore \boxed{n = \frac{A\Delta B}{Re}}$$

Igualando (1) a (2)

$$R\frac{\Delta q}{\Delta t} = A\frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Resposta: D

06. A fem induzida total vai ser a soma das fems que se induz em cada giro — cada fio que forma a bobina. A fem média individual vai depender basicamente da variação da área da espira, pois o campo magnético é uniforme e constante. Inicialmente o campo atravessa toda a área, pois é paralelo ao vetor área — lembre-se de que o vetor área é perpendicular à superfície da área no ponto —, e, no final, o campo não atravessa a área, pois o vetor área se torna perpendicular ao campo magnético.

$$|Fem|_m = 200\frac{|\Delta(BA)|}{\Delta t} = 200B\frac{|\Delta A|}{\Delta t} =$$

$$= 200 \cdot 1{,}25\frac{\pi\left(5{,}0\times10^{-2}\right)^2}{15\times10^{-2}}\,V \simeq 130V$$

Resposta: E

07. Uma técnica muito útil concite em pensar na espira como um imã com norte e sul magnéticos determinados pela regra da mão direita em relação à corrente induzida. Por exemplo, na situação da questão, uma corrente induzida no sentido horário gera um campo magnético para baixo, assim, essa espira, com essa corrente induzida no sentido horário corresponde a um imã com polo norte para baixo e polo sul para cima. Se a corrente induzida for no sentido anti-horário, o campo magnético induzido é para cima e a espira vai corresponder a um imã com polo norte para cima e sul para baixo.
Na questão de que tratamos, a corrente induzida se dá de tal forma a evitar a variação do fluxo do campo magnético externo. Podemos simplificar isso dizendo que a espira vai "se transformar" em um imã com polaridade tal que evite a continuidade do movimento do imã original, pois assim impede-se a variação do fluxo do campo desse imã original através da espira. No primeiro caso, quando o imã original está se aproximando da espira, o seu norte tenta se aproximar da espira, logo, para evitar isso, a espira vai "se transformar" em um imã com norte para cima, para repelir o imã original; como visto no parágrafo anterior, isso acontece se a corrente induzida for no sentido anti horário. No segundo caso, quando a corrente está abaixo da espira, ela se afasta desta, com seu sul próximo da espira; a espira quer evitar esse afastamento, por isso "se tranforma" em um imã com polo norte para baixo, pois assim vai atrair o imã original, evitando que este se afaste. Como visto no parágrafo anterior, isso acontece se a corrente induzida for no sentido horário.
Essa maneira de resolver é muito interessante, mas fica a dica para que tente resolver sem usar essa "sacada". No primeiro caso, pense que, quando o imã vai se aproximando por cima, como as linhas de campo magnético "saem" do norte do imã, aumenta o fluxo desse campo através da superfície da espira, por isso a espira precisa produzir um campo para cima para contrabalancear isso, o que é possível com uma corrente induzida no sentido anti-horário. Tente resolver o outro caso pensando dessa mesma maneira, porém lembrando que as linhas de campo "entram " no sul magnético.

Resposta: D

08.
A) A luminosidade aumenta sempre que o movimento for acelerado, ou seja, sempre que o módulo da aceleração aumenta, pois, dessa forma, tem-se a maior taxa de variação do fluxo, não importa se afastando-se ou aproximando-se da espira. Então, de x = –1 m a x = 0, tem-se um movimento progressivo e acelerado, logo a luminosidade aumenta. De **x** = 1 m a x = 0, tem-se um movimento retrogrado e acelerado, logo, a luminosidade também aumenta. A diferença entre esses dois casos é que no primeiro a corrente induzida é antihorária — como vista pelo próprio imã, e no segundo é horária.
B) Diminui quando o MHS for retardado, o que não está contemplando nesse item, portanto o item está errado.
C) Os pontos em que x = –1 m e x = +1 m são os extremos do MHS, portanto, neles, o imã está parado, sem velocidade, assim, não há — instantaneamente — variação do fluxo do seu campo através da espira, portanto não há corrente induzida, deixando, assim, a lâmpada apagada.
D) A luminosidade é mínima quando é nula, o que ocorre, como visto no item c, quando o imã se encontra nos extremos do MHS, portanto este item está errado.

Resposta: C

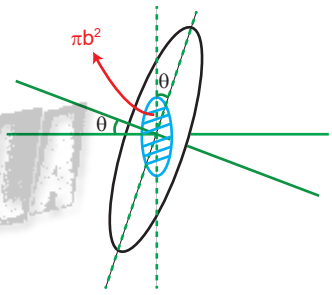
09. Fora do solenoide o campo é nulo; dentro o campo é proporcional à corrente elétrica, que nesse caso varia linearmente com o tempo.

$$B = \mu_0\, n\, k\, t$$

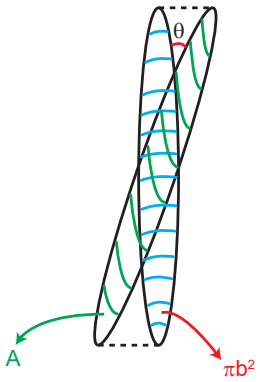
A variação desse campo através de parte da superfície da espira circular, bem como a própria variação da superfície atravessado por esse campo produzirão uma corrente induzida na espira. Associando a lei de Ohm com a lei de Faraday-Lenz-Neumann

$$Ri = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\vec{B}\cdot\vec{A}\right) = \frac{d}{dt}\left[B\left(A\cos(\theta)\right)\right].$$

Agora vem a principal ideia da questão. Perceba que o termo entre parênteses é sempre igual à área da seção transversal do solenoide.



$$A\cos(\theta) = \pi b^2$$



$$Ri = \mu_0 nk\pi b\frac{d}{dt}(t)$$

$$\boxed{i = \frac{\mu_0 nk\pi b^2}{R}}$$

Resposta: B

10. A corrente que circula no fio produz um campo elétrico que atravessa a superfície da espira. Se essa corrente variar — o que pode ser obtido ajustando o valor da resistência —, esse campo também vai variar, o que produzirá uma variação de seu fluxo através da espira; essa variação, por sua vez, dará origem a uma corrente induzida na espira.
Pela lei de Ohm

$$\xi = Ri \quad (1)$$

O campo produzido por um fio longo é

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}, \quad (2)$$

onde **x** é a distancia do fio até o ponto onde se calcula o campo.

Dividindo (1) por (2) e isolando R.

$$R = \frac{\mu_0 \xi}{2\pi x},$$

$$\therefore R\alpha \frac{1}{B}\alpha \frac{1}{\phi_B}$$

Conclui-se que quanto maior a resistência menor o fluxo do campo que o fio longo produz através da superfície da espira. Para evitar a diminuição desse fluxo, surge uma corrente induzida na espira no sentido horário, pois esta gera um campo apontando para fora da página, assim como o campo criado pelo fio longo.
Por fim, quando um fio longo tem corrente no mesmo sentido da corrente no lado mais próximo de uma espira de lados paralelos, como no nosso caso, ocorre atração. Você mesmo pode provar isso facilmente, observando que a força de atração entre o fio longo e o lado mais próximo é maior que a de repulsão entre o fio longo e o lado mais distante. Portanto, está provado o que se afirma no item **b**, isto é, quando e aumenta a resistência, o fio longo e a espira se atraem.

Resposta: B

11. Pela lei de Faraday-Lenz-Neumann

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -A\frac{dB}{dt}$$

O campo produzido por uma espira é proporcional à sua corrente.

$$B = \mu_0 ni \therefore \therefore \varepsilon = -2\mu_0 nA\frac{d\phi}{dt}\left(\text{sen}\left(4\pi t\right)\right)$$
$$\therefore \varepsilon = -8\pi\mu_0 nA\cos\left(4\pi t\right)$$

Assim, enquanto a corrente é uma função senoidal, a fem é uma função cossenoidal invertida, devido ao sinal negativo. Isso está presente nos itens **c** e **d**.

Resposta: B

12. Essa variação do fluxo do campo magnético produz uma fem na trajetória circular seguida pelos elétrons. Como a variação desse fluxo é constante, essa fem também será constante, assim, haverá sempre uma ddp "empurrando" os elétrons e aumentando as suas velocidades.
Sabemos que o trabalho realizado por essa tensão sobre um elétron é dado pelo produto do módulo da carga elementar e da própria tensão.
Esse trabalho representa a quantidade de energia que é dada a cada elétron em uma volta. Para descobrir toda a energia dada a um elétrons, basta multiplicarmos isso pelo número total de voltas, qual seja, 500.000.
Pelo teorema do trabalho-energia cinética

$$\Delta E_c = \tau_{fem} \Rightarrow E_c - 2\ \text{MeV} = 1{,}6\times10^{-19}\ \cancel{C}\cdot 500\times10^3\cdot 1000\frac{J}{\cancel{C}}$$
$$E_c = 2\ \text{MeV} + 500\times10^6\times\underbrace{1{,}6\times10^{-19}\ J}_{1\ eV}\ \therefore$$
$$E_c = 2\ \text{MeV} + 500\ \text{MeV} \Rightarrow \boxed{E_c = 502\ \text{MeV}}$$

Resposta: C

13. Determinação da corrente induzida na espira quadrada:

$$Ei_i = |fem| = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = B\frac{\Delta A}{\Delta t} = B\ell v \therefore i_i = \frac{B\ell v}{R} \quad (1)$$

Determinação da corrente induzida no fio:

$$F = Bi_2 L \therefore i_2 = \frac{F}{BL} \quad (2)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{\frac{B\ell v}{R}}{\frac{F}{BL}} \Rightarrow \frac{B^2\ell Lv}{RF} = \frac{(10{,}0)^2\cdot 0{,}6\cdot 2{,}0\cdot\frac{0{,}6}{0{,}9}}{5{,}0\cdot 8{,}0}$$

$$\therefore \boxed{\frac{i_1}{i_2} = 2{,}0}$$

Resposta: D

14. Percebe-se que a fem é constante, assim vamos relacioná-la com a variação do fluxo $\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$.

$\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ representa a inclinação da reta no gráfico do fluxo em função do tempo.
No intervalo de t = 0 a t = 1 s, a variação do fluxo é positiva e constante, logo a fem é negativa e constante.
No intervalo de t = 1 s a t = 2 s, a o fluxo não varia, logo a fem é nula.
No intervalo de t = 2 s a t = 4 s, a variação do fluxo é negativa e constante, logo a fem é positiva e constante.
No intervalo de t = 4 s a t = 5 s, a variação do fluxo é positiva e constante, logo a fem é negativa e constante.
Apenas o item b representa essas situações.

Resposta: B

15.

A) $|fem|_{média} = 50\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \Rightarrow 50\frac{2\cdot 10 - 2\cdot 1}{10-1}\ V \Rightarrow 50\frac{18}{9}\ V$

B) O campo está entrando na página e está aumentando, uma vez que seu fluxo está aumentando, assim, surge uma corrente induzida no sentido anti-horário, a qual produz um campo magnético induzido saindo da página, opondo-se ao aumento do campo magnético inicial.

Resposta: 100V e sentido anti-horário.

GEORGENES – REV.: SHERYDA